

## 非接触・空中伝搬超音波による柱上開閉器の浸水量評価の検討

Evaluation of the Deepness of Water Immersion in the Pole Mounted Switch  
by Non Contact Air Coupled Ultrasonic Testing

大平 克己 田中 雄介 馬場 比路志 高橋 雅和  
KATSUMI OHIRA YUSUKE TANAKA HIROSHI BABA MASAKAZU TAKAHASHI

ジャパンプローブ株式会社  
JAPAN PROBE CO., LTD.

渡辺 雅人  
MASATO WATANABE

東京電力株式会社  
TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY

電柱に取り付けられている”柱上開閉器”は現在、接触式超音波により内部に水がたまっているかどうかの測定を行っている。しかしながら接触時に危険（接触時の振動による漏電事故）が伴う。そこで非接触での測定が望まれる。  
今回、開閉器を模擬した水槽に水を入れて、非接触・空中伝搬超音波により漏洩ガイド波を発生させ浸水深さ測定を行った。測定結果は超音波伝搬シミュレーションの結果とも良く一致しており、非接触・空中伝搬超音波による浸水深さ測定の目途が立ったので報告する。

KEYWORDS : Pole Mounted Switch、Simulation、Guided Waves

### 1. 緒言

現在、配電システムの効率運用や配電線事故時の健全区間の早期送電を目的に、電柱上に深伝流の開放・投入を行う柱上開閉器が設置されている。この柱上開閉器の中には、長期の使用によりパッキンの劣化や外箱の腐食などにより、雨水の浸水があることが報告されている<sup>1)</sup>。これを放置すると、絶縁性の低下などが懸念され、停電などの配電線事故となることが危惧されている。現在の浸水状況の点検手法として、底面に超音波プローブを接触させて水面の反射波を感知して行われている。しかし、この点検手法は底面に直接接触させるため、取り付け作業や接触時の振動により揺れた水面が開閉器内の機器に触れ、開閉器内部短絡の恐れがある。また、開閉器の外箱と点検装置が接触しているため、万が一内部短絡が起きてしまった場合には、点検員の人身災害の発生が危惧されていた。そこで、長野ら<sup>2), 3), 4)</sup>は数百 kHz の程度の空中超音波プローブを用い、模擬水槽を用いて底面からの V 透過法による水面反射波の測定を行うことで浸水量の定量評価の基礎的検討を行っており、アクリル模擬水槽においてはプローブ間距離と浸水深さに良好な比例関係があることを確認している。しかしながら、空中から超音波を入射し難い、ステンレス鋼製の模擬水槽では水面からの反射が得られず、実際の開閉器の鋼やステンレス鋼での測定には、超音波プローブの感度向上が不可欠と結論付けている。

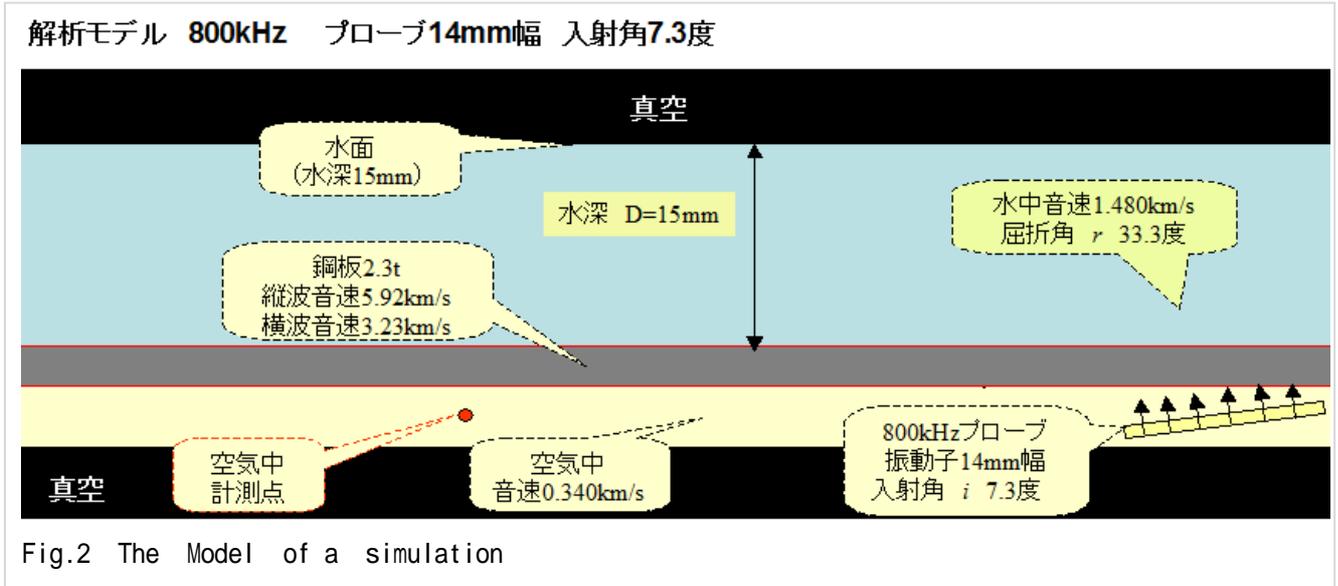


Fig. 1 A Pole Mounted Switch

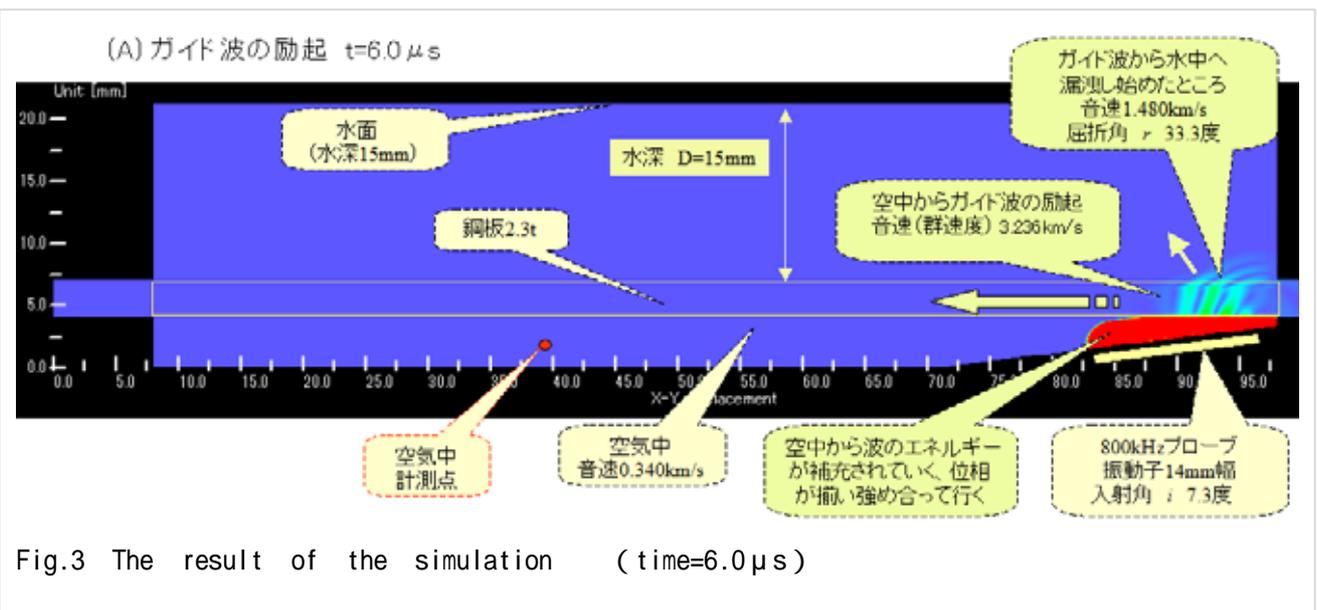
上記課題の解決のため、弊社では空中超音波プローブの感度を従来比で 10dB 以上向上し、本研究ではこのプローブを用いて、V 透過法により実際の柱上開閉器の浸水量評価手法を超音波伝搬シミュレーションと実験の両面から検討した。

## 2. 超音波伝搬シミュレーションによる測定の手法検討

超音波伝搬シミュレーターSWAN21<sup>5)</sup>により、図2のようにモデルで超音波の伝搬の様子を計算することで、浸水深さの測定手法を検討した。以下に計算結果の一例を示して説明する。図2のモデルでは、800kHz プローブ幅 14mm、入射角  $i$  7.3 度、鋼板 2.3mm 厚さ、水深 15mm としている。ここで入射角  $i$  は厚さ 2.3mm の鋼板にガイド波が効率よく励起するように、事前に計算したガイド波（板波）の位相速度から求めた。また受信を行う計測点を左下の空气中に設けて、時間波形、A-Mode 測定を行えるようにした。



以下に、超音波伝搬の強度計算結果を時間順に図3から図6に示す。時間波形の計算結果を図7に示す。図3(A:時刻=6.0 $\mu$ s)では空中から入射した超音波により鋼板にガイド波を励起され、一部はガイド波から水中へ超音波が漏洩している様子（放出する角度  $r$  は 33.3 度）を示している。図4(B:時刻=14.6 $\mu$ s)ではガイド波が図左へ伝搬していく際に水中（33.3 度）および空中（7.3 度）へ超音波を漏洩し続けていることを示している。図5(C:時刻=23.6 $\mu$ s)では、水面からの反射波が 33.3 度で伝搬しており、ガイド波から空中へ漏洩した超音波が計測点に近づきつつある（図7(C)）。図6(D:時刻=41.6 $\mu$ s)では1回目



(B)水中への漏洩  $t=14.6 \mu\text{s}$

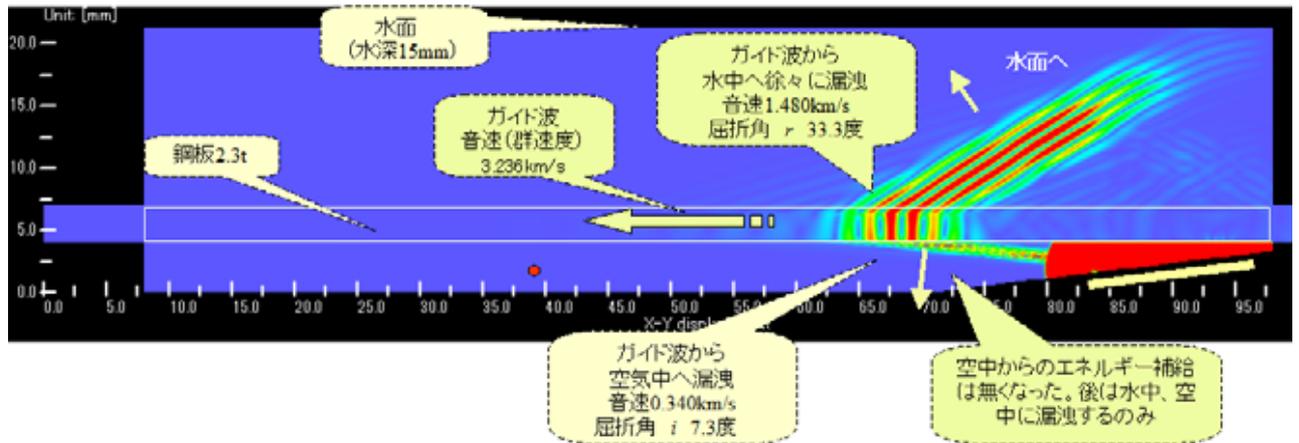


Fig.4 The result of the simulation (time=14.6  $\mu\text{s}$ )

(C)水面からの反射  $t=23.6 \mu\text{s}$

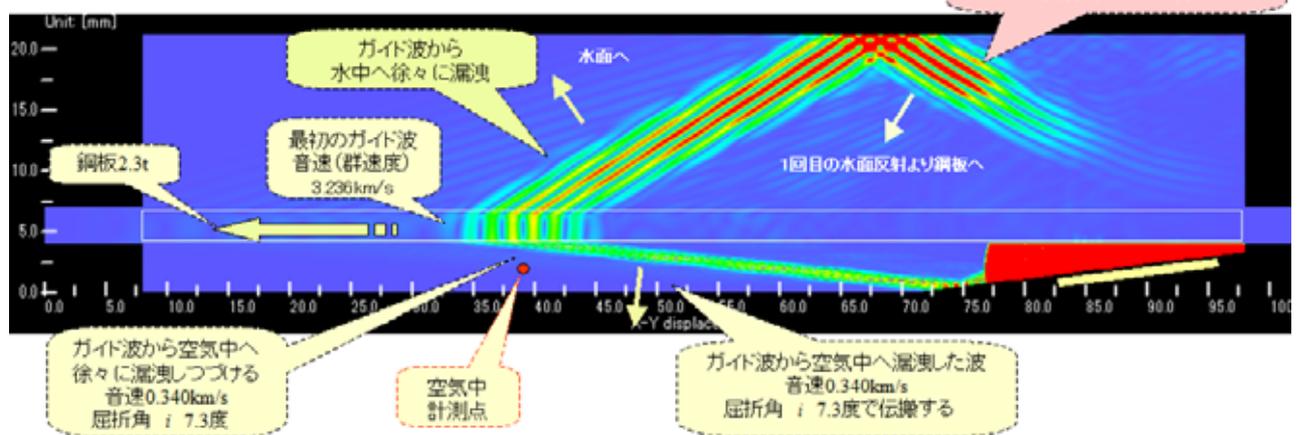


Fig.5 The result of the simulation (time=23.6  $\mu\text{s}$ )

(D)水面反射波の観測点への到達  $t=41.6 \mu\text{s}$

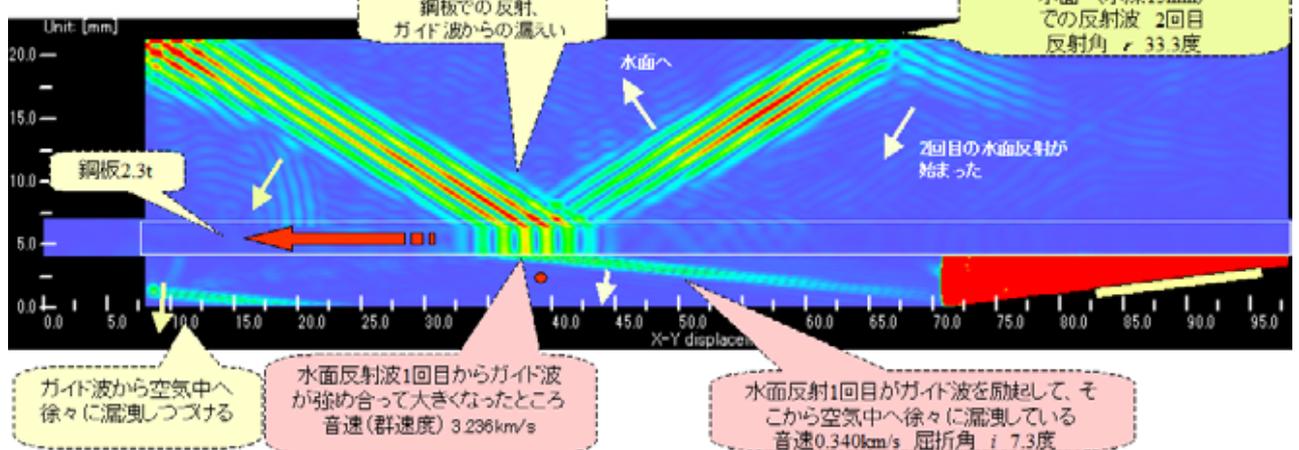
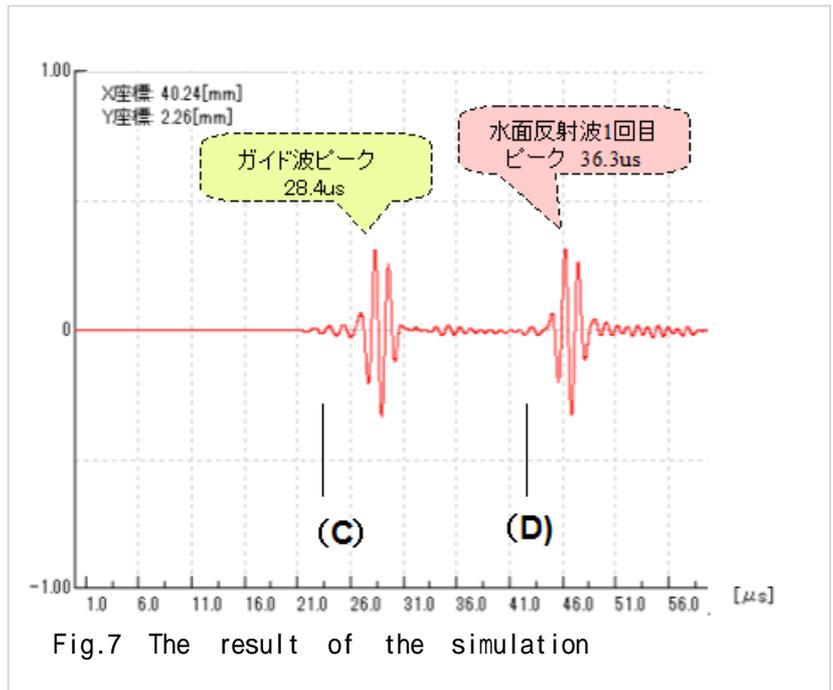


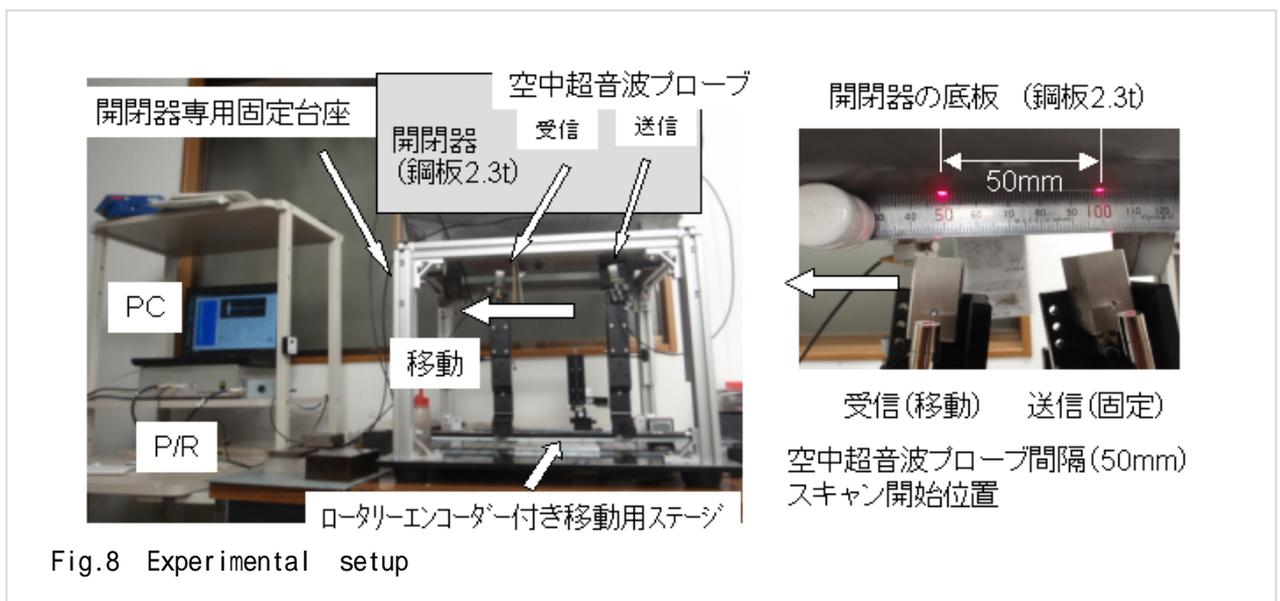
Fig.6 The result of the simulation (time=41.6  $\mu\text{s}$ )

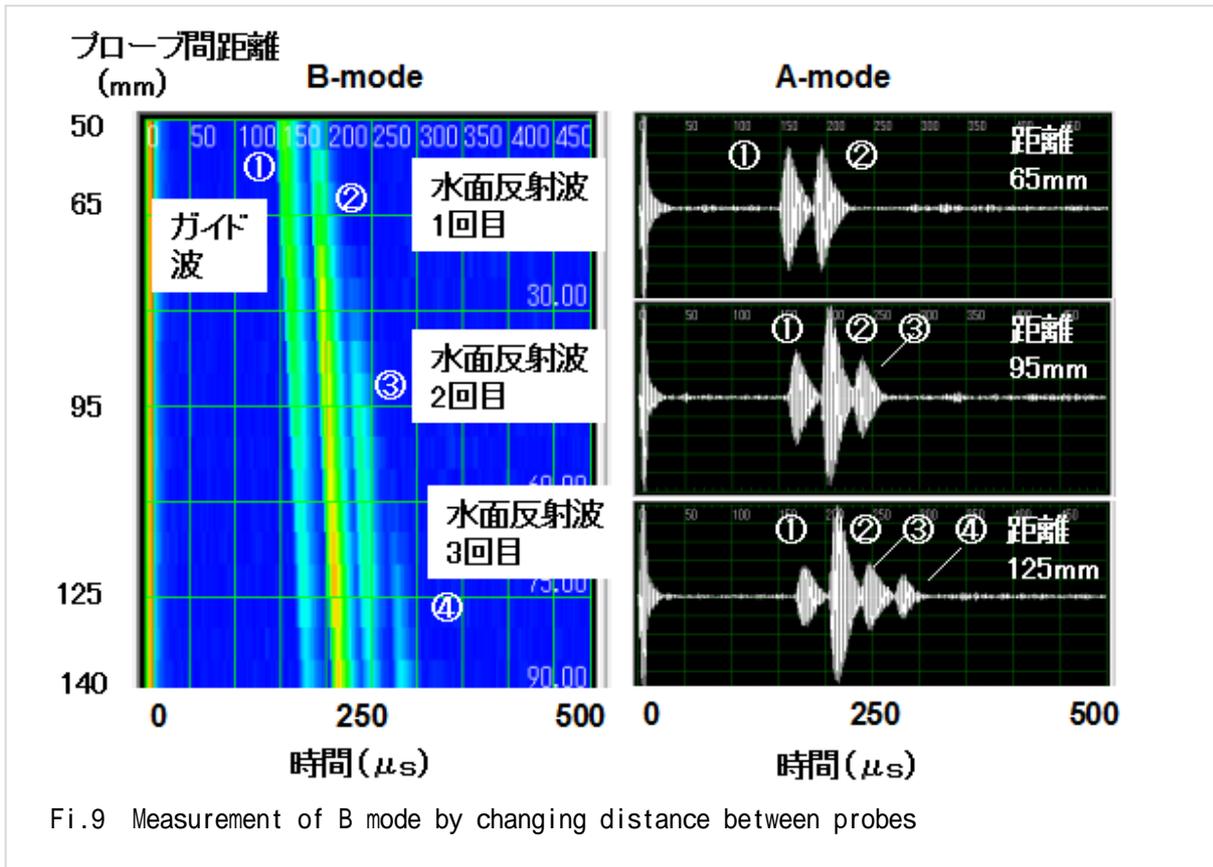
の水面反射から鋼板にガイド波が励起され、そこから、水中と空中へ超音波が漏れいしている様子を示しており、この水面反射波（1回目）が計測点へ近づきつつある（図7（D））。図7の時間波形において、ガイド波[空中 ガイド波 空中の経路]のピークが $28.4\mu\text{s}$ であり、水面反射波1回目[空中 ガイド波 水中 水面反射(1回目) ガイド波 空中の経路]のピークが $36.3\mu\text{s}$ である。したがって、浸水深さ $D=15\text{mm}$ のときのピークの時間差  $t=7.9\mu\text{s}$ となる。浸水深さ $D$ を変更して計算を行うことで、 $D(\text{mm})=0.852 \times t(\mu\text{s})$ であることが分かった。なお、この相関係数は空中での入射角  $i$ 、水中での屈折角（反射角） $r$ によって決まる定数である。



### 3. 鋼板製の柱上開閉器を用いた実証実験

上記のシミュレーションで得た知見に基づき、開閉器（鋼板 2.3mm 厚さ）を用いてガイド波と水面反射波（1回目）の時間差  $t$  から浸水深さ  $D$  を求める実証実験を図8のように装置をセットして行った。開閉器を専用固定台座に載せて空中に浮かせ、空中超音波プローブ（800kHz）を下に配置する。送信プローブは入射角 7.3 度となるように固定し、受信プローブは受信角 7.3 度のまま、移動ステージで左側へ手で移動する。この際、ステージのボールねじに取り付けたロータリーエンコーダーにより、パルサーレーシーバ（JPR-600C）と連動することで、送受信のプローブ間距離を 5mm ピッチで変えながらガイド波および水面反射波の測定を行った。送信パースト波は 200V、5 波を使用し、受信信号はプリアンプ（PA-60）で 800kHz 近傍のみを 60dB 増幅して測定を行った。





Fi.9 Measurement of B mode by changing distance between probes

測定結果の一例を図9と10に示す。図9は、浸水深さ  $D=30\text{mm}$  でプローブ間距離を  $50\text{mm}$  から  $140\text{mm}$  まで  $5\text{mm}$  間隔で測定した結果である。左側がBモードで、右側はプローブ間距離  $65\text{mm}$ ,  $95\text{mm}$ ,  $125\text{mm}$  の際のAモード、時間波形である。図中 ①はガイド波[空中ガイド波 空中の経路] , ②は水面反射波1回目[空中ガイド波 水中水面反射(1回目) ガイド波 空中の経路]である。③は面反射波1回目[空中ガイド波 水中水面反射(1回目) ガイド波 水中水面反射(2回目) ガイド波 空中の経路]である。④は3回目の水面反射波である。この結果より、プローブ間距離を離すことにより、水中での多重反射も測定できることが分かる。次にプローブ間距離を  $65\text{mm}$  として、浸水深さ  $D$  を  $20\text{mm}$ ,  $30\text{mm}$ ,  $40\text{mm}$ ,  $50\text{mm}$  と変えた場合のAモードを図10に整理した。この図より浸水深さを変えてもガイド波の伝搬時間は変化しないものの、水面反射波は浸水深さに対応して到達時間が遅くなる事が分かる。この結果から ①と②の伝搬時間差  $t(\mu\text{s})$  と浸水深さ  $D(\text{mm})$  の関係をグラフ化すると図

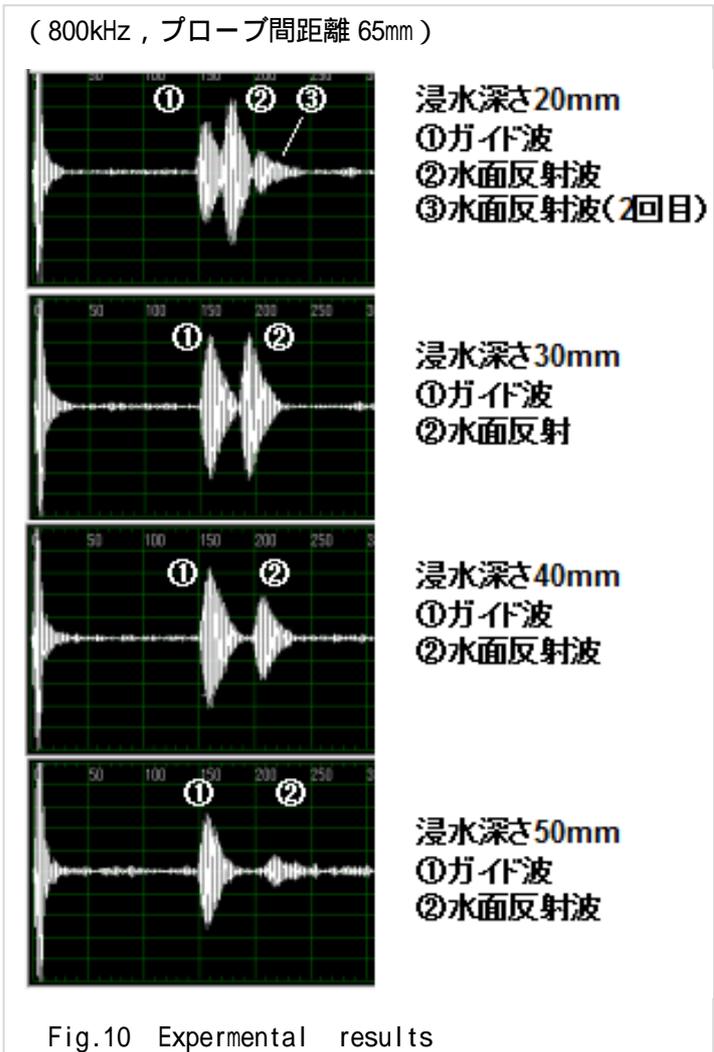


Fig.10 Experimental results

11 となる。実験式として、 $D(\text{mm})=0.827 \times t(\mu\text{s})$ 、相関係数  $R^2=0.9978$  と非常に良い相関が得られることが分かった。

またこの実験式は計算から求めた、相関係数とよく一致しており、理論的にも本実験結果が正しいことが分かる。

ここでは紙面の都合上省いたが、図 10 では浸水深さが 50mm では 水面反射波が小さくなっている。これはプローブ間距離 65mm が最適でないことに由来している。50mm 以上の深さ測定ではさらにプローブ離す必要がある。実際の現場では浸水深さが不明であるため、プローブ間距離を一定とした場合は測定できない場合が出てくるため、図 9 のようにプローブ間距離を変えて測定する必要がある。

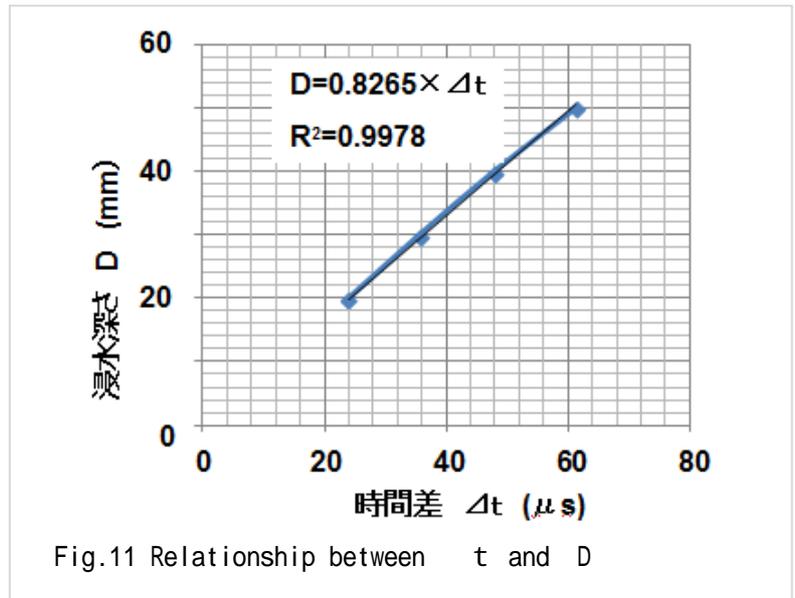


Fig.11 Relationship between  $t$  and  $D$

#### 4. まとめ

非接触・空中伝搬超音波による柱上開閉器の浸水量評価が、ガイド波を用いた測定手法により理論と実験より可能であることが分かった。実際測定手順は以下のとおりである。

- (1) 底板の厚さにおいてガイド波が励起される入射角を用いる。
- (2) 底板に対して、上記入射角となるように送受信プローブを対向させて配置する。
- (3) ガイド波と水面反射波の時間差  $t$  と浸水深さ  $D$  の実験式を求める。
- (4) プローブ間距離を変えながら、ガイド波と水面反射波を測定し、その時間差  $t$  を求め、上記の実験式から浸水深さ  $D$  を求める。

#### 謝辞

ガイド波（板波）の位相速度、群速度の計算を行っていただいた徳島大学西野先生に感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 俊野 雅博：「水気・湿気に伴う事故例と防止対策」,ShinDENKI, vol.10, pp.51-55(2011)
- 2) 長野智彦ら：「非接触超音波手法による柱上気中開閉器の浸水量評価手法の基礎的検討」平成 23 年度電気学会全国大会, 7-126(2011)
- 3) 長野智彦ら：「柱上気中開閉器の空気超音波法による非接触浸水量評価手法の基礎的検討」平成 23 年度電気関係学会九州支部連合大会, 02-2P-02, pp. 461(2011)
- 4) 長野智彦ら：「空中超音波センサによる柱上気中開閉器の浸水量評価手法の基礎的検討」電気学会研究会資料. ED, 放電研究会 2012(16), pp.43-48, 2012-01-26
- 5) 田中雄介ら：「超音波伝搬シミュレーターSWAN21-2D 版」日本非破壊検査協会 平成 24 年度秋季講演大会講演概要集, pp.53-54 (2012)